УДК 621.365.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАНСНОГО КОНТУРА ОТ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ «ИНДУКТОР – НАГРЕВАЕМЫЙ ОБЪЕКТ»

С.К. Земан, А.В. Осипов, М.С. Сахаров

ФГНУ «НИИ автоматики и электромеханики», г. Томск
E-mail: mikhaelf@mail.ru

Проведено исследование импедансных характеристик последовательного резонансного контура цепи нагрузки системы индукционного нагрева. Предложен алгоритм определения границ изменения резонансной частоты и добротности колебательного контура при изменении температуры нагреваемого объекта, величины зазора между индуктором и объектом, числа витков и тока индуктора, номинальной частоты.

Введение

В настоящее время высокочастотный индукционный нагрев активно применяется в промышленности для широкого спектра технологических операций. Источником магнитного поля, вызывающего нагрев детали, является индуктор. Образованная в результате электромагнитного взаимодействия с деталью система «индуктор – нагреваемый объект» является для преобразователя частоты комплексной активно-индуктивной нагрузкой, индуктивный характер которой компенсируется конденсатором, с образованием последовательного резонансного контура. Важной особенностью систем индукционного нагрева является зависимость электрофизических свойств детали от ее температуры, поэтому в процессе нагрева изменяется комплексный импеданс системы «индуктор – нагреваемый объект», добротность и частота резонансного контура. Кроме того, эти величины зависят от конструктивных и электрических параметров индукторной системы, что особенно ярко выражено при нагреве ферромагнитных материалов.

Как правило, для питания колебательного контура используется мостовая схема резонансного инвертора, особенностью работы которой является введение системы фазовой автоподстройки частоты, параметры которой во многом определяются такими параметрами колебательного контура, как резонансная частота, добротность, а также диапазоны изменения этих величин в процессе нагрева. В связи с этим актуальной является задача исследования и определения зависимостей параметров колебательного контура от температуры, конструктивных и электрических характеристик индукторной системы. Несмотря на существование ряда работ [1–3], посвященных исследованию импедансных характеристик индукторной системы, вопросы расчета требуемых диапазонов подстройки частоты и изменения добротности резонансного контура остаются не освещенными. Решение этой сложной задачи является целью данной работы, в которой рассмотрен случай нагрева ферромагнитных заготовок при последовательном соединении компенсирующей емкости с индуктором.

Математическая модель системы «индуктор – нагреваемый объект»

Систему «индуктор – нагреваемый объект» можно представить эквивалентной схемой (рис. 1), которая может быть преобразована к последовательному соединению эквивалентной индуктивности $L_Э$ и эквивалентного активного сопротивления $R_Э$, импеданс которой можно найти по широко известным формулам [1]:

$$\dot{Z} = R_Э + j\omega L_Э;$$

$$R_Э = R_И + R_Д \frac{\omega^2 L_{ic}^2}{R_Д^2 + \omega^2 (L_Д + L_s + L_{ic})^2};$$

$$L_Э = L_{ic} \frac{R_Д^2 + \omega^2 (L_Д + L_s)(L_Д + L_s + L_{ic})}{R_Д^2 + \omega^2 (L_Д + L_s + L_{ic})^2}, \qquad (1)$$

где ω – рабочая частота, $R_И$ – активное сопротивление витков индуктора, L_{ic} – индуктивность обратного замыкания, L_s – индуктивность рассеивания, $R_Д$, $L_Д$ – активное сопротивление и индуктивность нагреваемого объекта.

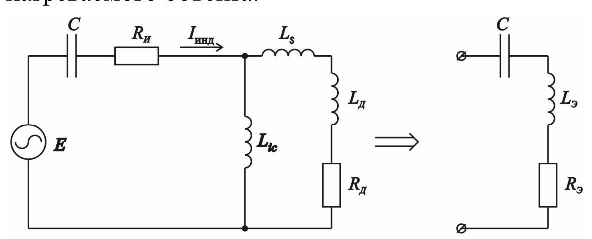


***Рис. 1**. Эквивалентная схема системы «индуктор – нагреваемый объект» при последовательном соединении компенсирующего конденсатора с индуктором*

Индуктивность обратного замыкания обусловлена магнитным потоком вне индуктора, ее расчет затруднителен, прежде всего, из-за сложной формы поля на этом участке магнитной цепи. Задача расчета L_{ic} для цилиндрических деталей решается путем введения коэффициента Нагаока k согласно формуле [1]:

$$L_{ic} = L_0 \frac{k}{1-k}, \qquad (2)$$

где L_0 – индуктивность пустого индуктора:

$$L_0 = \frac{\pi D^2 \mu_0 W^2}{4l}, \qquad (3)$$

где D и l – диаметр и длина индуктора, W – число его витков, μ_0=1,25·10^{-6} – магнитная постоянная.

В инженерных расчетах коэффициент Нагаока определяется соотношением [2]:

$$k(D/l) = 0,224 + 0,756 \cdot \exp(-0,452\, D/l). \qquad (4)$$

Индуктивность рассеивания L_s учитывает магнитный поток в зазоре между нагреваемой деталью и индуктором и рассчитывается по формуле [3]:

$$L_s = \frac{\pi \mu_0 W^2 (D+h)h}{l}, \qquad (5)$$

где h – величина зазора.

Активное сопротивление заготовки вычисляется по формуле [3]:

$$R_Д = \left(\frac{W}{l}\right)^2 S \sqrt{\frac{\omega \rho(\theta) \mu_0 \mu(H_0, \theta)}{2}}, \qquad (6)$$

где $\rho(\theta)$ – удельное сопротивление, S – площадь нагреваемой поверхности, $\mu(H_0,\theta)$ – магнитная проницаемость среды, зависящая от напряженности поля H_0 и температуры θ.

Зависимость магнитной проницаемости большинства углеродистых сталей от температуры определяется соотношением [3]:

$$\begin{cases} \mu(H_0, \theta) = 1 + \dfrac{\alpha \cdot H_0^{\beta} - 1}{\left(1 + \left(\dfrac{\theta}{\theta_K - \theta}\right)^{\chi}\right)^{\delta}}, & \theta \le \theta_K \\ \mu = 1, \quad \theta > \theta_K \end{cases}, \qquad (7)$$

где α=3·10^5, β=–0,85, χ=1,9, δ=0,16 – коэффициенты, полученные в результате компьютерной обработки усредненных экспериментальных данных по методу наименьших квадратов [3], θ_K – температура, соответствующая точке Кюри.

Для расчета температурной зависимости удельного сопротивления нагреваемого материала объекта в первом приближении можно воспользоваться классическим соотношением [3]:

$$\rho(\theta) = \rho_0 (1 + \alpha_T \theta), \qquad (8)$$

где ρ_0 – удельное сопротивление при температуре 0 °С, α_T – температурный коэффициент удельного сопротивления.

Напряженность магнитного поля определяется по формуле [3]:

$$H_0 = \frac{W I_0}{l}, \qquad (9)$$

где I_0 – амплитуда тока через индуктор.

Индуктивное и активное сопротивления на границе проводящей среды равны [3], поэтому индуктивность и активное сопротивление нагреваемого объекта связаны соотношением:

$$R_Д = \omega L_Д. \qquad (10)$$

Таким образом, импедансные характеристики системы «индуктор – нагреваемый объект» зависят от тока, протекающего через индуктор, что значительно затрудняет расчет.

После расчета импедансных характеристик рассчитывается емкость колебательного контура из условий резонансного режима работы:

$$C = \frac{1}{\omega_p^2 L_{Э0} + \dfrac{R_{Э0}^2}{4L_{Э0}}}, \qquad (11)$$

где $L_{Э0}$, $R_{Э0}$ – значения $L_Э$ и $R_Э$ при температуре окружающей среды.

Попытка аналитически выразить резонансную частоту колебательного контура из соотношений (1–11) приводит к необходимости решать иррациональное уравнение, поэтому целесообразно применение численных методов.

Расчет температурных зависимостей резонансной частоты и добротности последовательного колебательного контура для системы «индуктор – нагреваемое тело»

При изменении температуры детали изменяются ее электрофизические характеристики, соответственно, меняется глубина проникновения вихревых токов в нагреваемый объект. Глубина проникновения, в свою очередь, определяет собственную частоту и добротность резонансного контура. Указанное обстоятельство значительно затрудняет расчет температурной зависимости резонансной частоты и добротности, поэтому для их расчета использованы итерационные вычисления. На рис. 2 показан предлагаемый алгоритм вычисления емкости компенсирующего конденсатора и зависимости резонансной частоты и добротности от температуры при постоянном токе индуктора. В блок-схеме алгоритма приняты следующие обозначения: $\theta_н$ – наименьшая температура, приравниваемая к температуре окружающей среды, $\theta_в$ – наибольшая температура, $\Delta\theta$ – приращение температуры, $f_{ном}$ – номинальная частота (резонансная частота контура при θ=$\theta_н$), $I_{стаб}$ – стабилизированная амплитуда тока, протекающего через индуктор, f – текущее значение частоты, $f_0(\theta)$ – резонансная частота при заданной температуре, ε – наибольшая абсолютная погрешность вычисления частоты, Q – добротность резонансного контура.

На рис. 3 показаны зависимости резонансной частоты и добротности от температуры, полученные в результате вычислений по алгоритму (рис. 2). Зависимости построены для индуктора с числом витков W=5 и геометрическими размерами D=0,1 м, l=0,1 м, при величине зазора между витками индуктора и нагреваемой деталью h=5 мм, при $f_{ном}$=10 кГц и $I_{стаб}$=1 кА.

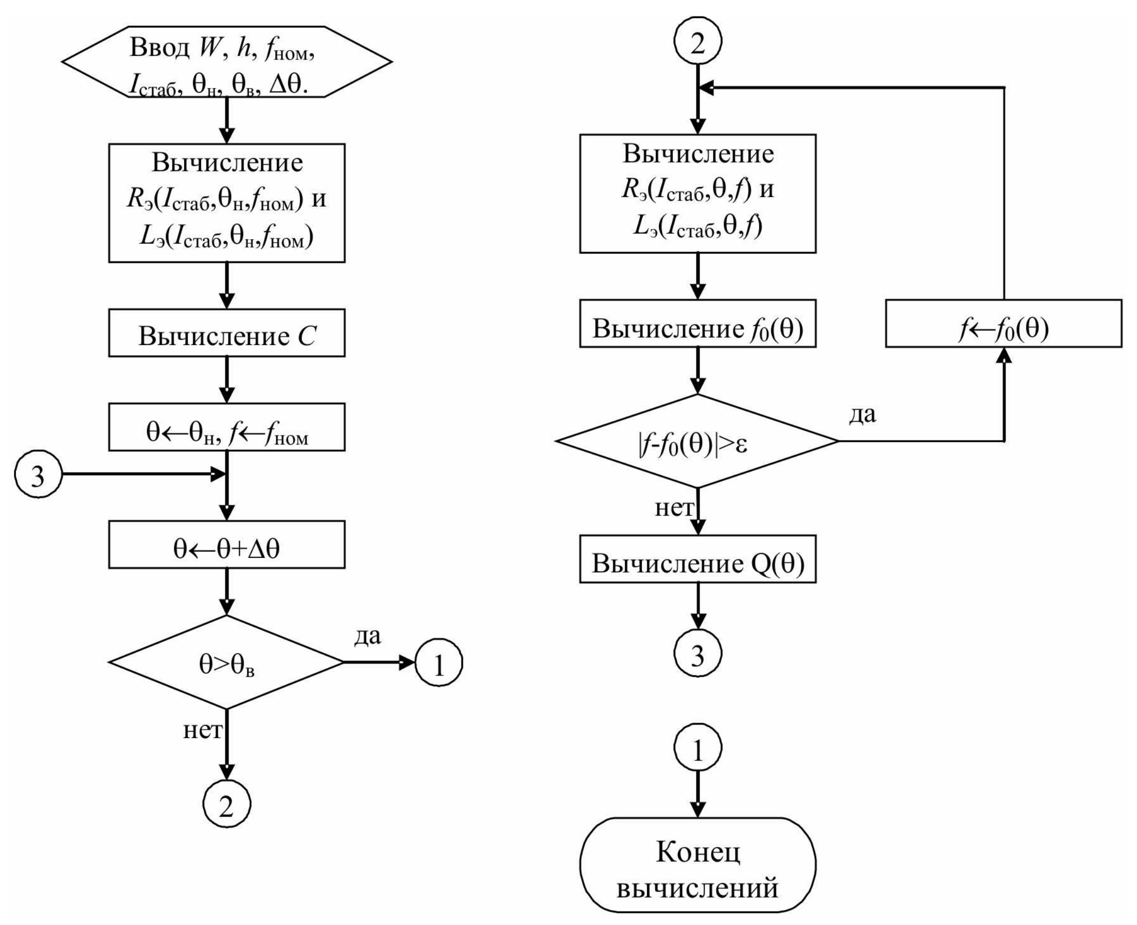


Рис. 2. *Алгоритм вычисления температурных зависимостей резонансной частоты и добротности колебательного контура при фиксированных значениях $I_{стаб}$, $f_{ном}$, h и W*

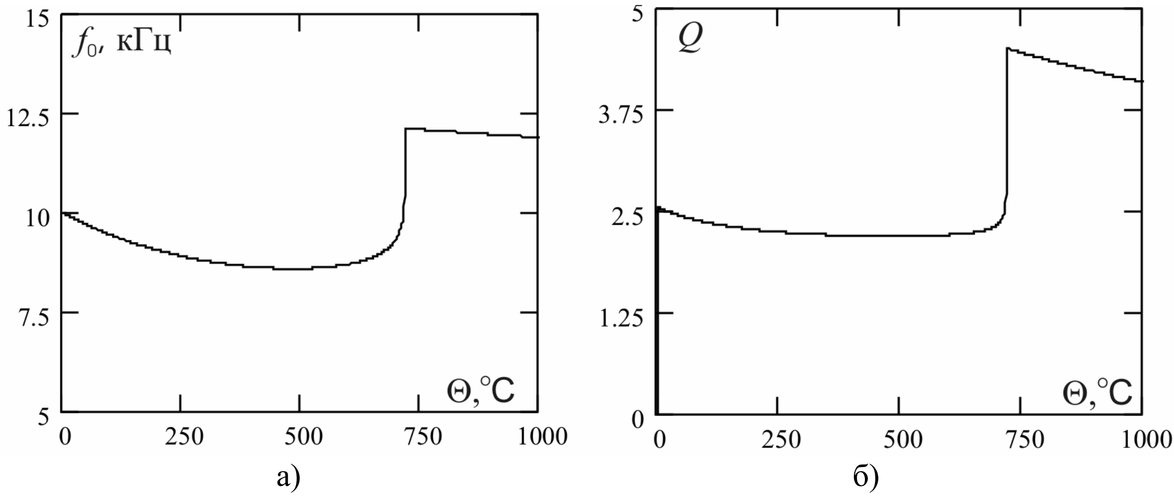


Рис. 3. *Температурная зависимость: а) резонансной частоты; б) добротности колебательного контура при W=5, D=0,1 м, l=0,1 м, h=5 мм, $f_{ном}$=10 кГц и $I_{стаб}$=1 кА*

Анализ полученных в результате расчета зависимостей (рис. 3) показывает, что при температуре вблизи точки Кюри наблюдается скачкообразное изменение частоты и добротности системы. В случае изменения геометрических и электрических параметров системы «индуктор – нагреваемая деталь» качественный характер зависимостей сохраняется. На практике температурные зависимости характеризуются более плавным переходом через точку Кюри, поскольку в расчетах не учитываются динамические изменения теплофизических свойств материалов.

Зависимости диапазонов подстройки частоты и изменения добротности от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор – нагреваемое тело»

Подстройка резонансной частоты колебательного контура в процессе нагрева происходит автоматически, поэтому для практических расчетов преобразователей частоты (ПЧ) важно определение не столько зависимостей подстраиваемых параметров от температуры, сколько предельный диапазон их изменения. Эти параметры, как показывает практика, существенно зависят от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор – нагреваемый объект», в частности от величины зазора между индуктором и деталью, определяющего поток рассеяния, от тока индуктора, номинальной частоты в начальных условиях и т. д.

На рис. 4 приведены графические зависимости экстремальных значений резонансной частоты и добротности колебательного контура от величины зазора между индуктором и деталью, полученные в результате расчета по алгоритму (рис. 2) при разных значениях $I_{стаб}$.

Из приведенных результатов видно, что с ростом зазора диапазон подстройки частоты уменьшается, а границы частотного диапазона приближаются к номинальной резонансной частоте. Это объясняется существенным увеличением индуктивности рассеяния, при котором изменение индуктивности детали $L_Д$ уже не оказывает заметного влияния на эквивалентную индуктивность всей системы. Следует отметить, что при проектировании индуктора стремятся максимально уменьшить зазор, т. к. это позволяет уменьшить требуемую мощность резонансного конденсатора. Зависимость диапазона подстройки частоты от тока индуктора обусловлена уменьшением магнитной проницаемости стали с ростом напряженности поля индуктора согласно (7). Верхняя граница резонансной частоты зависит от тока индуктора, несмотря на то, что в области температур выше точки Кюри μ=1. Это объяснимо изменением резонансной емкости по условию сохранения прежней номинальной резонансной частоты (10 кГц). Аналогичным образом объясняется рост добротности с увеличением зазора: при h=0 добротность не меняется и равна единице, т. к. индуктивность индукторной системы почти полностью определяется индуктивностью детали $L_Д$.

Добротность может быть выражена из формул (1), (10) путем элементарных преобразований:

$$Q = \frac{L_Д^2 + (L_Д + L_s)(L_Д + L_s + L_{ic})}{L_Д L_{ic}}.$$

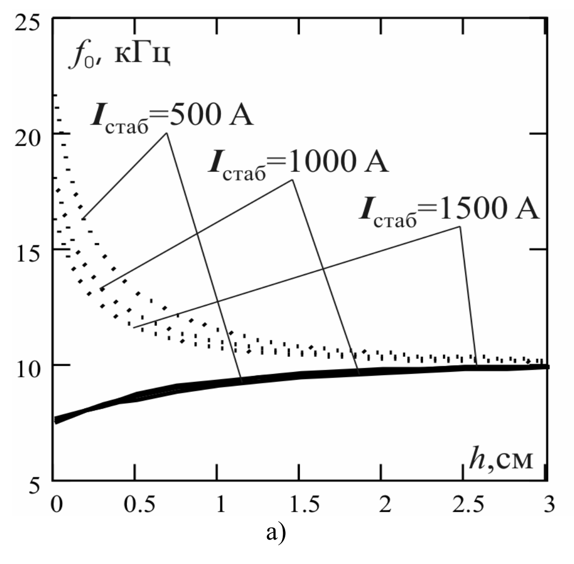
Обычно L_{ic} намного больше $L_Д$ [2, 3], тогда

$$Q = \frac{L_Д + L_s}{L_Д} = 1 + \frac{L_s}{L_Д}. \quad (12)$$

Из выражений (5) и (12) следует, что при h=0 добротность Q=1 и не зависит от температуры заготовки в индукторе, рис. 4, *б*.

Другой важной задачей является исследование изменения характеристик резонансного контура при варьировании количества витков индуктора. На рис. 5 приведены графические зависимости границ подстройки резонансной частоты колебательного контура и добротности от количества витков индуктора при h=0,5 см.

Характеристики (рис. 5, *б*) при малом количестве витков индуктора могут быть неточны, поскольку увеличивается магнитный поток рассеивания. Можно отметить общую тенденцию сужения диапазона подстройки частоты с увеличением плотности намотки витков индуктора, что приводит к росту напряженности магнитного поля в индукторе (9). В этом случае нагрев происходит при гораздо меньших значениях магнитной проницаемости, соответственно уменьшается и диапазон ее изменения. Хотя из этого не следует, что необходи-



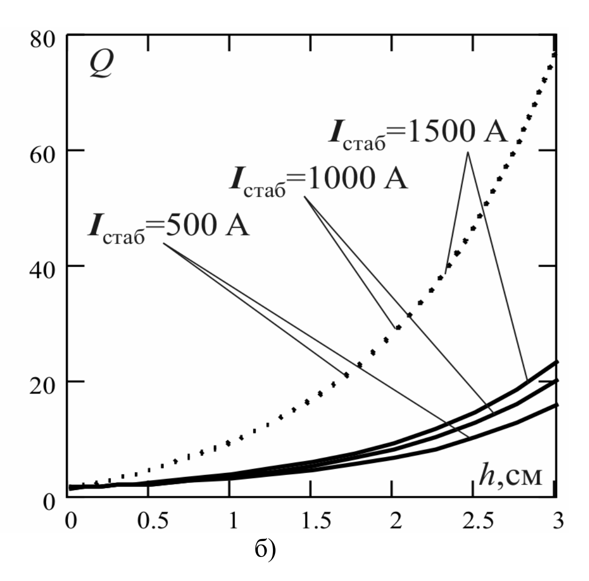


Рис. 4. *Зависимость диапазона изменения: а) резонансной частоты; б) добротности колебательного контура от величины зазора между индуктором и деталью при различных значениях $I_{стаб}$ и при W=5, D=0,1 м, l=0,1 м, $f_{ном}$=10 кГц*

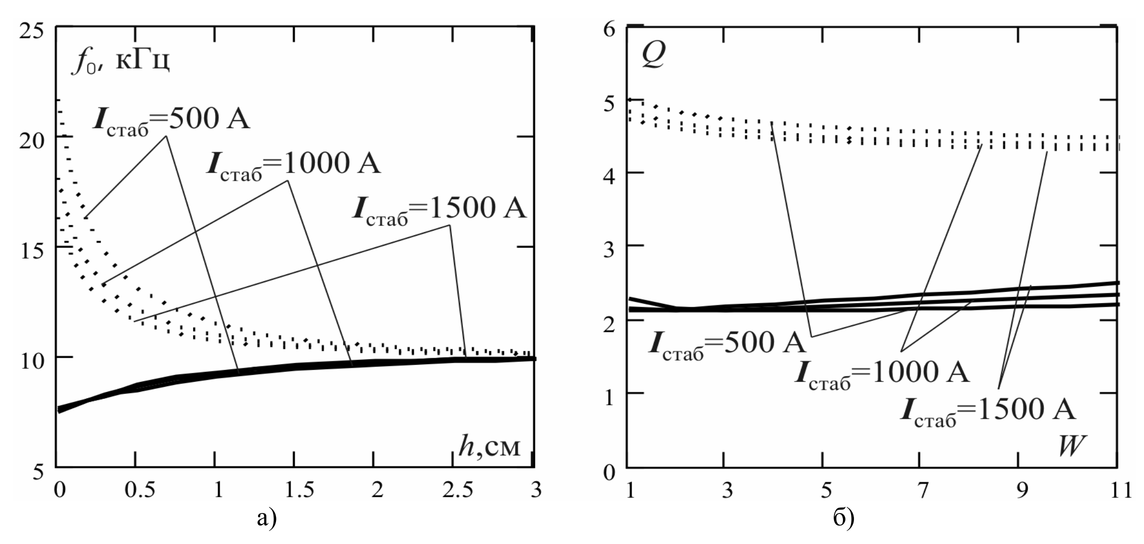


Рис. 5. *Зависимость границ изменения: а) резонансной частоты; б) добротности колебательного контура от количества витков индуктора при различных значениях $I_{стаб}$ и при h=0,01 м, D=0,1 м, l=0,1 м, $f_{ном}$=10 кГц*

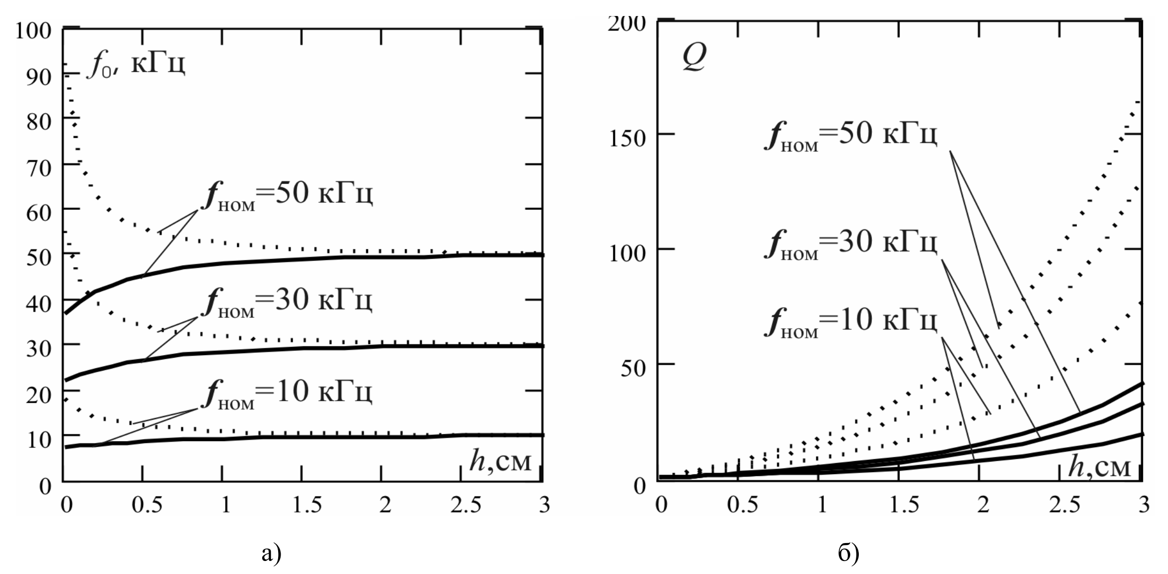


Рис. 6. *Зависимости границ изменения: а) резонансной частоты; б) добротности колебательного контура от величины зазора между индуктором и деталью при разных значениях $f_{ном}$ и при W=5, D=0,1 м, l=0,1 м, $I_{стаб}$=1 кА*

мо стремиться к максимальному увеличению плотности намотки витков, т. к. это приводит к увеличению напряжения на резонансном конденсаторе.

Далее рассмотрены зависимости диапазона подстройки частоты и изменения добротности от *h* и для разных значений начальной частоты $f_{ном}$ при стабилизированной амплитуде токе индуктора $I_{инд}$=1 кА.

Из приведенных графиков (рис. 6) следует отметить значительное увеличение добротности с ростом частоты $f_{ном}$. Это объясняется тем, что при увеличении частоты снижается глубина проникновения вихревых токов в заготовке, соответственно, уменьшается $L_Д$, что при прежнем значении L_s приводит, согласно выражению (12), к росту добротности.

Заключение

Предложенный алгоритм определения границ изменения резонансной частоты и добротности колебательного контура позволяет определить параметры контура при изменении температуры нагреваемого объекта при фиксированных значениях величины зазора между индуктором и объектом, числа витков и тока индуктора, номинальной частоты.

На основе алгоритма получены зависимости границ диапазонов изменения собственной частоты и добротности контура от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор – нагреваемое тело». Установлено, что с ростом величины зазора между индуктором и нагреваемой деталью и увеличением числа витков при условии постоянства номинальной резонансной частоты диапазон изменения частоты сужается до нуля. Максимум изменения резонансной частоты получен при нулевой величине зазора между индуктором и нагреваемым объектом. Установлено значительное увеличение добротности колебательного контура с ростом величины зазора и номинальной резонансной частоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 325 с.
2. Осипов А.В. Системы высокочастотного индукционного нагрева заготовок перед пластической деформацией. Автореф. дис. ... к.т.н. – Томск, 2004. – 18 с.
3. Владимиров С.Н., Земан С.К., Осипов А.В., Толстов В.П. Особенности индукционного нагрева ферромагнитных сталей при различных режимах работы преобразователя частоты // Известия вузов. Электромеханика. – 2004. – № 1. – С. 50–54.
4. Ромаш Э.М., Драбович Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н. Высокочастотные транзисторные преобразователи. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.

Поступила 04.09.2006 г.

УДК 621.382.323